

学校编码：10384
学号：B200334013

密级_____

厦门大学

博 士 学 位 论 文

厦门市常见蔬菜镉的累积特性及其
污染调控措施研究

Cadmium Accumulation and its Control Measures
of Common Vegetables in Xiamen

汤惠华

指导教师姓名：卢昌义 教授

专 业 名 称：环 境 科 学

论文提交日期：2012 年 5 月

论文答辩时间：2012 年 6 月

2012 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	IV
第 1 章 前言	1
1.1 研究厦门低镉污染区蔬菜镉累积及其调控措施的现实意义.....	2
1.2 研究进展	3
1.2.1 重金属污染现状其污染毒害案例.....	4
1.2.2 蔬菜地土壤的镉污染源及其污染状况.....	5
1.2.3 蔬菜镉累积差异研究进展.....	9
1.2.4 镉胁迫对蔬菜生长的影响.....	10
1.2.5 镉影响蔬菜硝酸盐和矿质元素的研究进展.....	12
1.2.6 镉在蔬菜内迁移分布累积特性.....	13
1.2.7 镉污染毒害蔬菜的亚细胞水平研究进展.....	15
1.2.8 镉污染毒害蔬菜的形态分析研究进展.....	17
1.2.9 利用农艺措施对蔬菜镉累积的调控研究进展.....	18
1.3 研究目标、内容、技术路线.....	23
1.3.1 研究目标.....	23
1.3.2 研究内容.....	24
1.3.3 技术路线.....	24
第 2 章 材料与方法	26
2.1 无土栽培	26
2.1.1 供试蔬菜品种.....	26
2.1.2 蔬菜培养及处理.....	27
2.1.3 取样和分析测定方法.....	27
2.1.4 蔬菜亚细胞组分的分离.....	27
2.1.5 蔬菜体内镉的化学形态分析.....	28
2.1.6 叶片叶绿素含量和光合作用参数的测定.....	28

2.1.7 叶片硝酸盐和亚硝酸盐的测定.....	28
2.1.8 元素含量的测定.....	28
2.2 土壤盆栽试验	29
2.2.1 供试材料成分.....	29
2.2.2 试验设计.....	29
2.3 仪器和试剂	30
2.3.1 实验仪器.....	30
2.3.2 实验试剂.....	30
2.4 市售蔬菜污染研究	30
2.4.1 材料与测定方法.....	30
2.5 土壤背景值研究——果园土壤.....	31
2.6 数据处理	31
第 3 章 厦门地区土壤和蔬菜镉污染现状研究.....	32
3.1 厦门地区果园土壤重金属背景值.....	32
3.2 厦门城郊蔬菜生产环境镉污染状况.....	34
3.3 厦门各主要蔬菜基地重金属污染状况.....	35
3.4 厦门市售蔬菜重金属污染含量状况.....	35
3.5 小结	38
第 4 章 镉对蔬菜生长的毒害影响	39
4.1 不同蔬菜叶片镉毒害的外观症状.....	39
4.2 镉处理对蔬菜失水的影响.....	43
4.3 镉对蔬菜叶绿素含量的影响.....	45
4.3.1 镉对叶菜类叶绿素含量的影响.....	45
4.3.2 镉对花菜类蔬菜叶绿素含量的影响.....	47
4.3.3 镉对根菜类叶绿素含量的影响.....	48
4.3.4 镉对茎菜类叶绿素含量的影响.....	49
4.4 镉对蔬菜光合作用参数的影响.....	51
4.4.1 镉对叶菜类蔬菜光合作用参数的影响.....	51
4.4.2 镉对花菜类蔬菜光合作用参数的影响.....	52
4.4.3 镉对根菜类蔬菜光合作用参数的影响.....	53
4.4.4 镉对茎菜类蔬菜光合作用参数的影响.....	54

4.5 镉处理对蔬菜鲜重抑制率的影响.....	55
4.6 讨论.....	58
4.6.1 蔬菜镉毒害的症状和失水.....	58
4.6.2 蔬菜对镉毒害的耐性与生物量抑制率的关系.....	58
4.6.3 镉胁迫与叶绿素、光合作用的关系.....	59
4.7 本章小结.....	61
第 5 章 镉对蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐及营养元素吸收的影响.....	63
5.1 镉毒害对蔬菜内硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	63
5.1.1 镉毒害对小白菜叶片硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	63
5.1.2 镉毒害对油菜叶片硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	64
5.1.3 镉毒害对菠菜叶片硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	65
5.1.4 镉毒害对萝卜叶片硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	66
5.1.5 镉毒害对莴笋叶片硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响.....	67
5.2 镉毒害对蔬菜体内营养元素吸收的影响.....	68
5.2.1 镉对蔬菜体内铁吸收的影响.....	68
5.2.2 镉对蔬菜体内锌吸收的影响.....	69
5.2.3 镉对蔬菜体内镁吸收的影响.....	70
5.3 讨论.....	71
5.4 本章小结.....	72
第 6 章 厦门蔬菜生产常用品种的镉累积差异.....	73
6.1 不同蔬菜地上部镉含量.....	74
6.1.1 叶菜不同品种地上部镉累积差异.....	74
6.1.2 花菜茎菜根菜地上部镉累积差异.....	75
6.1.3 蔬菜植株不同生长位置的镉含量差异.....	76
6.2 不同蔬菜根系镉含量.....	76
6.2.1 叶菜不同品种根系镉含量.....	76
6.2.2 花菜茎菜根菜根系镉累积差异.....	77
6.3 蔬菜对镉的富集能力（富集系数）.....	78
6.3.1 叶菜不同品种根系对镉的富集能力差异.....	78
6.3.2 花菜茎菜根菜的根系对镉的富集能力差异.....	79
6.4 蔬菜镉累积浓度的时间变化特点.....	80

6.5 不同镉处理蔬菜的镉累积总量	81
6.5.1 几种叶菜地上部的镉累积总量.....	81
6.5.2 花菜茎菜根菜不同器官的镉累积总量.....	82
6.5.3 地上部镉累积总量的时间变化特点.....	83
6.6 讨论	84
6.6.1 不同蔬菜种类对镉的耐性及累积差异.....	84
6.6.2 镉累积与镉处理浓度的关系.....	85
6.6.3 镉累积与不同镉处理时间的关系.....	86
6.6.4 镉不同器官的镉累积.....	87
6.6.5 不同品种间镉的累积总量差异及低镉污染区种植风险.....	88
6.7 本章小结	89
第 7 章 镉在蔬菜体内的亚细胞分布和形态分布	92
7.1 镉在蔬菜亚细胞组分中的分布	92
7.1.1 花椰菜叶片中镉的亚细胞分布.....	92
7.1.2 白尖叶莴笋和红尖叶莴笋叶片中镉的亚细胞分布差异.....	93
7.1.3 镉在不同品种白花菜叶片中的亚细胞分析.....	95
7.2 镉在蔬菜中的亚细胞分布与镉对蔬菜抑制率的关系	96
7.3 镉在蔬菜体内的存在形态	97
7.3.1 花椰菜叶片中镉的形态分布.....	97
7.3.2 甘蓝叶片中镉的形态分布.....	99
7.3.3 青花菜叶片中镉的形态分布.....	100
7.4 镉的分布与光合作用参数的相关分析	101
7.5 讨论	102
7.5.1 镉在蔬菜中的亚细胞分布与其对镉的耐性.....	102
7.5.2 镉在不同蔬菜种类的亚细胞分布差异.....	103
7.5.3 蔬菜体内镉形态影响转运及抗性.....	104
7.5.4 镉胁迫对光合作用影响的亚细胞水平分析.....	106
7.6 本章小结	106
第 8 章 不同农艺措施对镉污染土壤镉累积和铁营养的调控效果 ..	108
8.1 镉对几种蔬菜生长的影响	108
8.1.1 高镉 ($6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理.....	108

8.1.2 低镉 ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理	109
8.2 不同水平镉在蔬菜上的累积	109
8.2.1 蔬菜不同器官镉含量差异	109
8.2.2 在蔬菜不同器官镉富集系数	110
8.2.3 在蔬菜不同器官镉累积量差异	110
8.3 不同农艺措施对镉污染土壤几种蔬菜镉累积的影响效果	111
8.3.1 施用硫酸锌的影响效果	111
8.3.2 施用微生物肥料的影响效果	121
8.3.3 施用石灰的影响效果	124
8.3.4 施用鸡粪的影响效果	127
8.4 不同农艺措施对蔬菜铁营养的影响	131
8.4.1 不同农艺措施对青花菜铁吸收的影响	131
8.4.2 不同农艺措施对莴笋铁吸收的影响	132
8.4.3 不同农艺措施对芥蓝菜铁吸收的影响	132
8.5 讨论	133
8.5.1 镉对莴笋、青花菜、胡萝卜、芥蓝菜生长的影响	133
8.5.2 镉在莴笋、青花菜、胡萝卜、芥蓝菜体内的累积差异	134
8.5.3 硫酸锌、微生物、石灰、鸡粪对镉在蔬菜上的累积的影响	134
8.5.4 不同农艺措施对蔬菜铁营养的影响	136
8.5.5 不同农艺措施对蔬菜种植镉污染环境蔬菜品种布局及调控对策	137
8.6 本章小结	137
第 9 章 总结	139
9.1 主要研究结论	139
9.2 主要创新点	142
9.3 不足之处与研究展望	143
附表	144
参考文献	146
攻读博士期间参与的科研项目和发表的论文	163
致谢	165

厦门大学博硕士论文摘要库

Table of Contents

Abstract (In Chinese).....	I
Abstract (In English)	IV
Chapter 1 Foreword	1
1.1 Research motivation and background.....	2
1.2 Research advances.....	3
1.2.1 Heavy metal pollution situation and pollution poison case	4
1.2.2 Pollution sources of cadmium vegetable soil	5
1.2.3 Advances in the differences of cadmium accumulated in vegetables.....	9
1.2.4 Advances in cadmium stress on vegetable growth	10
1.2.5 Advances in cadmium stress on the quality of the vegetables.....	12
1.2.6 Advances in cumulative nature of migration and distribution of cadmium in vegetables.....	13
1.2.7 Advances in cadmium subcellular distribution in vegetables.....	15
1.2.8 Advances in chemical combined forms of cadmium in vegetables.....	17
1.2.9 Advances in regulation of cadmium accumulation by agronomic measures	18
1.3 Objectives and approach of present study	23
1.3.1 Objectives	23
1.3.2 Contents	24
1.3.3 Approach.....	24
Chapter 2 Materials and methods.....	26
2.1 Soilless culture	26
2.1.1 Tested vegetables	26
2.1.2 Vegetable culture and treatments.....	27
2.1.3 The tested parameters and methods	27
2.1.4 Analysis of cadmium in subcellular distribution	27
2.1.5 Analysis of chemical combined forms of cadmium	28
2.1.6 Test of chlorophyll content and photosynthesis parameters of vegetables.	28

2.1.7 Test of nitrate and nitrite contents in vegetables	28
2.1.8 Test of element contents	28
2.2 Soil pot experiment.....	29
2.2.1 Tested materials	29
2.2.2 Treatments.....	29
2.3 Instruments and reagents	30
2.3.1 Instruments.....	30
2.3.2 Reagents.....	30
2.4 Study for heavy metal of market vegetables	30
2.4.1 Materials and tested methods.....	30
2.5 Heavy metal background of soils in fruit garden	31
2.6 Data analysis	31
Chapter 3 Cadmium pollution situationin in soils and vegetables in	
Xiamen	32
3.1 Heavy metal of vegetable soils in Xiamen	32
3.2 Cadmium pollution situationin in Xiamen suburbs of vegetables soils.....	34
3.3 Heavy metal contents of vegetables soils in Xiamen.....	34
3.4 Heavy metal content of vegetables in Xiamen markets	35
3.5 Conclusion.....	38
Chapter 4 Effects of Cadmium on the growth of vegetables	39
4.1 Sensory toxicity symptoms of cadmium on the leaf of vegetables.....	39
4.2 Effects of cadmium on vegetables water content.....	43
4.3 Effects of cadmium on chlorophyll content of vegetables.....	45
4.3.1 Leaf vegetables	45
4.3.2 Cauliflower class of vegetables	47
4.3.3 Root vegetables.....	48
4.3.4 Stem vegetables	49
4.4 The Effects of Cadmium on photosynthesis parameters of vegetables	51
4.4.1 Effects on leaf class of vegetables	51
4.4.2 Effects on cauliflower class of vegetables.....	52

4.4.3 Effects on root class of vegetables.....	53
4.4.4 Effects on stem class of vegetables.....	54
4.5 Effects of cadmium on inhibitory rate of vegetables fresh weight.....	55
4.6 Discussion	58
4.6.1 Sensory symptoms of poison of cadmium and vegetable dehydration.....	58
4.6.2 Relationship between resistance of cadmium and inhibitory rate of fresh weight.....	58
4.6.3 Relations between cadmium stress and photosynthesis.....	59
4.7 Conclusion	61
Chapter 5 Effects of Cadmium on nitrate and nitrite contents and nutrient element uptake	63
5.1 Nitrate and nitrite contents of vegetables.....	63
5.1.1 Nitrate and nitrite contents of Pak choi.....	63
5.1.2 Nitrate and nitrite contents of Choy sum.....	64
5.1.3 Nitrate and nitrite contents of Spinich.....	65
5.1.4 Nitrate and nitrite contents of Radish leaf.....	66
5.1.5 Nitrate and nitrite contents of Asparagus lettuce.....	67
5.2 The Effects of cadmium on nutrient element uptake of vegetables	68
5.2.1 Effects of cadmium on Iron uptake.....	68
5.2.2 Effects of cadmium on Zinc uptake.....	69
5.2.3 Effects of cadmium on Magnesium uptake	70
5.3 Discussion	71
5.4 Conclusion.....	72
Chapter 6 Differences of cadmium accumulation in common vegetables for production in Xiamen	73
6.1 Cadmium contents of shoot in different vegetables	74
6.1.1 Cadmium contents in leaf class of vegetables	74
6.1.2 Cadmium contents in Cauliflower, root and stem class of vegetables	75
6.1.3 Cadmium contents in cadmium contents in leaf of different growth position.....	76

6.2 Cadmium contents in root of different vegetables	76
6.2.1 Leaf class of vegetables	76
6.2.2 Cauliflower, root and stem class of vegetables.....	77
6.3 Cumulative capacity of vegetables on cadmium (cumulative coefficient)...	78
6.3.1 Differences of cumulative coefficient of shoot and root in leaf vegetables	78
6.3.2 Differences of cumulative coefficient of shoot and root in Cauliflower, root and stem class of vegetables	79
6.4 Cadmium accumulation feature vary with treatment period	80
6.5 Cumulative quantity of cadmium in different vegetables	81
6.5.1 Cumulative quantity of cadmium in leaf vegetables.....	81
6.5.2 Cumulative quantity of cadmium in Cauliflower, root and stem class of vegetables.....	82
6.5.3 Feature of cadmium cumulative quantity varied with treatment period	83
6.6 Discussions	84
6.6.1 Differences of tolerance and accumulation of cadmium among vegetables species	84
6.6.2 Cadmium accumulation varied with concentrations of cadmium	85
6.6.3 Cadmium accumulation varied with treatment period of cadmium.....	86
6.6.4 Cadmium accumulation in shoot and roots of vegetables	87
6.6.5 Differences of cumulative quatity among vegetables species and planting ricks in low cadmium pollluted area	88
6.7 Conclusion	89
 Chapter 7 Subcellular distribution and chemical forms of Cadmium	
in vegetables.....	92
7.1 Subcellular distribution of cadmium	92
7.1.1 Subcellular distribution of cadmium in cauliflower	92
7.1.2 Differences of subcellular distribution of cadmium in two variety of Asparagus lettuce.....	93
7.1.3 Differences of subcellular distribution of cadmium in different variety of Cauliflower	95
7.2 Relationship between cadmium subcellular distrution and inhibitory rate of cadmium on vegetables	96
7.3 Chemical forms of cadmium in vegetables.....	97

7.3.1 Chemical forms of cadmium in Cauliflower	97
7.3.2 Chemical Forms of cadmium in Cabbage.....	99
7.3.3 Chemical Forms of cadmium in Broccoli.....	100
7.4 Correlation analysis of subcellular distribution of cadmium and photosynthetic parameter	101
7.5 Discussion	102
7.5.1 Subcellular distribution of cadmium in vegetables and its patience to cadmium.....	102
7.5.2 Differences of subcellular distribution of cadmium in different variety of vegetables.....	103
7.5.3 Chemical forms of cadmium affecting its transshipment and resistance..	104
7.5.4 Relationship between the effects of cadmium stress on photosynthesis and cadmium contents in subcellular.....	106
7.6 Conclusion	106
Chapter 8 Regulation effects of different agronomic measure on Cadmium accumulation	108
8.1 Effects of Cadmium on the growth of vegetables	108
8.1.1 High cadmium ($6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) treatments	108
8.1.2 Low cadmium ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) treatments	109
8.2 Cadmium accumulation varied with treatments of Cadmium.....	109
8.2.1 Differences of cadmium in shoot and root of vegetables	109
8.2.2 Cadmium cumulative coefficient of shoots and roots in vegetables.....	110
8.2.3 Cumulative quantity of cadmium in shoots and roots of vegetables	110
8.3 Regulation Countermeasures effects of different agronomic measures on cadmium accumulation in several vegetables	111
8.3.1 Effects of ZnSO_4 on cadmium accumulation in several vegetables	111
8.3.2 Effects of Microbial fertilizer on cadmium accumulation in several vegetables.....	121
8.3.3 Effects of CaCO_3 on cadmium accumulation in several vegetables	124
8.3.4 Effects of Chicken manure on cadmium accumulation in several vegetables.....	127
8.4 Effects of agronomic measure on Iron nutrient at Cd treatments.....	131
8.4.1 Effects of agronomic measure on Iron uptake of Broccoli	131

8.4.2 Effects of agronomic measure on Iron uptake of Asparagus lettuce	132
8.4.3 Effects of agronomic measure on Iron uptake of Cale	132
8.5 Discussion	133
8.5.1 Effects of cadmium on the growth of Asparagus lettuce, Cale, Broccoli, Carrot	133
8.5.2 Differences of accumulation of cadmium in Asparagus lettuce, Cale, Broccoli, Carrot.....	134
8.5.3 The Effects of ZnSO ₄ , Microbial fertilizer, CaCO ₃ , Chicken manure on cadmium accumulation in vegetables	134
8.5.4 Effects of agronomic measure on Iron nutrient at Cd treatments	136
8.5.5 Vegetable planting plan and pollution countermeasures	137
8.6 Conclusion	137
Chapter 9 Summaries and conclusions.....	139
9.1 Conclutions.....	139
9.2 Innovations.....	142
9.3 DrawBacks and perpectives	143
Attached Tables	144
References	146
Paticipate in engaged research projects and published paper	163
Acknowledgements	165

摘 要

农产品质量安全近年来成为社会关注和舆论热点，蔬菜安全从广义上包含蔬菜产量、食用卫生又营养、种植环境可持续等三方面。蔬菜源头的生产环境决定蔬菜的安全，而环境污染已从城市扩散到农村，全国 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 耕地正在受到重金属污染的威胁。镉（Cd）有很强的生物毒性，一旦污染很难清除，其中毒效应可在 20~30 年后表现出来。

环境中 Cd 毒性不仅与其总量有关，还与植物的特性和生长环境相关。

有关 Cd 在蔬菜上累积，目前的研究涉及蔬菜种类较少，主要为叶菜类，而且缺乏处理时间较长的系统研究，尤其缺乏 Cd 在花菜类、根菜类、茎菜类等的累积分布及其控制的研究，一些治理措施可操作性差。

本文以厦门地区为例尝试通过土壤和蔬菜污染现状、无土栽培（0、5、15、30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理）和土壤盆栽试验（0、0.6、6.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd），研究 Cd 对蔬菜生长的毒害及其外观症状，探讨常用 Cd 在厦门常见几种蔬菜内累积分布差异及机理，以及低 Cd 污染土壤上根据 Cd 的不同累积特性合理规划蔬菜种植，减少 Cd 进入食物链的农艺措施，以提高农产品的卫生品质和可食性。主要研究结论如下：

（1）探讨厦门地区土壤和蔬菜及其水源 Cd 污染现状，结果表明，城郊局部地区存在少量工业污染，需加以防范，市售蔬菜 Cd 污染超标 50% 的比例很少。

（2）建立了 Cd 对莴笋、花菜、萝卜、茼蒿等几种蔬菜毒害的感官症状图谱及其对蔬菜生理如光合作用和叶绿素、硝酸盐亚硝酸盐、锌（Zn）、铁（Fe）、镁（Mg）含量以及生长量的影响规律。Cd 导致蔬菜光合作用强度、水分含量、叶绿素含量明显降低，硝酸盐亚硝酸盐及可食部分对 Zn、Fe、Mg 等营养元素的吸收减少，其程度因 Cd 处理时间和浓度、蔬菜种类而异。综合的结果体现在平均鲜重抑制率从小到大依次为：晚萝卜、白尖叶莴笋、秋冬春萝卜 < 花菜 6 号、红尖叶莴笋、花菜 8 号、小白菜 < 胡萝卜、茼蒿、菠菜、花菜 5 号 < 油菜、生菜、结球白菜 < 花菜 4 号、花菜 7 号 < 竹芥菜。

（3）提出厦门生产常用几种蔬菜对 Cd 的耐性及累积效应差异。通过不同

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库